

基于能量加权的喷灌液滴等效指标计算方法

张 锐^{1,2}, 刘一川³, 朱德兰^{1,2*}, 吴普特^{2,4,5,6}, 张晓敏⁷

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 3. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 长春 130012; 4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 5. 国家节水灌溉工程技术研究中心, 杨凌 712100; 6. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌, 712100; 7. 新疆维吾尔自治区水文局, 乌鲁木齐 830099)

摘 要: 等效液滴速度和粒径是衡量喷头喷洒质量和液滴破碎程度的重要参数。为改进和发展液滴等效指标计算方法, 该研究提出一种能量加权的液滴等效指标计算方法; 基于 5 种类型喷头喷洒液滴数据, 对比能量加权方法与其他类型方法计算结果的特点和差异; 建立能量加权等效指标与其他类型指标的回归关系。结果表明: 1) 能量加权等效方法计算的液滴等效速度和等效粒径可以表征出能量贡献率高的液滴特征; 2) 经验公式计算的液滴终端速度与能量加权等效液滴速度存在较好的指数回归关系, 和体积有关的等效粒径与能量加权等效液滴粒径存在较好的指数回归关系, 决定系数均大于 0.8; 3) 基于能量加权的等效液滴动能可以较好地估计单位时间和单位面积的降水动能, 对数回归关系的决定系数为 0.84。研究结果可为从能量角度反映液滴的平均特征提供思路。

关键词: 能量; 喷灌; 液滴; 等效指标; 动能; 粒径; 速度

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404218

中图分类号: S275.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-22-0069-10

张锐, 刘一川, 朱德兰, 等. 基于能量加权的喷灌液滴等效指标计算方法[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 69-78. doi:

10.11975/j.issn.1002-6819.202404218 <http://www.tcsae.org>

ZHANG Rui, LIU Yichuan, ZHU Delan, et al. A calculation method of droplet equivalent indicators of sprinkler irrigation based on energy-weighting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 69-78. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404218 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

喷灌农业中, 喷洒液滴粒径和速度决定液滴动能, 对土壤溅蚀、作物叶片打击、农田小气候等都存在较大影响^[1]。小粒径的液滴受风和蒸发的影响大^[2]。大粒径的液滴, 速度往往较大, 较大的打击动能容易导致其在土壤表面产生一层密实的结皮, 降低土壤入渗率^[3-4]。

受重力、空气阻力、张力等相互作用, 喷头产生水滴的过程具有很大的随机性和复杂性^[5]。即使在距离喷头相同的位置处, 液滴粒径和速度的变化范围都很大^[6]。根据等效对象的不同, 国内外学者将喷洒液滴等效指标分为喷洒液滴等效速度和喷洒液滴等效粒径^[7-8]。提出一种能合理描述测点处喷洒液滴平均特征的等效计算方法, 对于探究喷洒水滴沿射程方向的分布规律、表征喷洒水滴的破碎效果、衡量喷头的喷洒质量具有重要作用。

喷洒液滴的速度不仅影响着液滴在空中的运动时间和运动轨迹, 也决定了液滴对作物或土壤的打击强度^[9]。CHEN 等^[10]将所有液滴的速度相加, 取平均值, 得到基

于液滴数量加权的平均速度来描述 Nelson R33 LP 喷头沿射程方向的液滴速度分布。JIANG 等^[8]在探究圆形和非圆形喷嘴的液滴分布特性时, 也采用数量加权方法计算液滴平均速度。ZAPATA 等^[11]使用激光雨滴谱仪研究玉米冠层对喷灌水雾的截留作用时, 不仅用到了基于液滴数量加权的平均速度, 还将所有液滴速度从小到大排序, 计算了基于液滴数量分布累积频率曲线的中值速度。从数值来看, 中值速度基本大于平均速度, 部分测点的中值速度甚至比平均速度大 35% 以上。

除了采用上述的数理统计方法计算液滴等效速度, 许多研究人员也通过试验测试的手段获取自然或模拟降雨时液滴终端速度与液滴粒径的线性回归关系^[6, 12-14]。GE 等^[6]建立了 50PYC 喷头喷洒液滴落地等效速度与液滴粒径的对数回归关系。值得注意的是, 将不同等效方法获得的等效粒径输入某个计算等效速度经验公式, 输出的等效速度值可能出现较大差异, 所以经验公式应用的前提是明确自变量(液滴等效粒径)的取值。

常用的等效液滴粒径计算方法可分为基于液滴数量加权的平均粒径^[11]、基于液滴数量分布累积频率曲线的中值粒径^[11]、基于液滴体积加权的平均粒径^[6, 10]和基于液滴体积分布累积频率曲线的中值粒径^[10, 15]。这 4 种方法中尤其以液滴体积加权的平均粒径使用最为广泛。

根据等效原理可将各种等效方法归纳为与液滴数量有关和与液滴体积有关。测点处小液滴数目达到 90% 以上^[6], 数量加权等效粒径的计算值往往代表的是小粒径

收稿日期: 2024-04-29 修订日期: 2024-07-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1900400-4; 2021YFE0103000);

宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BBF02026)

作者简介: 张锐, 博士生, 研究方向为节水灌溉新技术。

Email: 17780525381@163.com

*通信作者: 朱德兰, 教授, 博士生导师, 研究方向为节水灌溉新技术。

Email: dlzhu@126.com

的液滴,难以反映其他粒径较大液滴的特性。小液滴数目虽然多,但其体积小,对测点处水量和能量的贡献率小^[15]。喷洒液滴对土壤表面和作物叶片的打击强度是用能量来衡量,一般来说,液滴粒径越大,携带的能量和降雨侵蚀力也越大^[14]。现有的喷洒液滴等效指标只考虑液滴的数量或体积,得出的液滴等效指标数值往往难以反映能量贡献率大的液滴特征,究其原因缺乏从液滴能量角度来定量计算液滴平均特征的指标。回顾喷洒液滴物理指标测试方法的发展历程,这可能是由于最初的面粉法和色斑法只能测量液滴数目和粒径^[16]。随着光学测试仪器在喷灌试验中的普遍应用,液滴速度也能被测量,相应的液滴等效指标计算方法也应得到改进和发展。因此,可以尝试在考虑液滴数量和体积的前提下,引入液滴的速度,提出一种能表征液滴能量的等效方法。

尽管许多计算液滴平均特征的方法已经提出并得到应用,但基于不同原理的等效方法却经常混用,缺乏统一的标准。比如 CHEN 等^[10, 17]在表征液滴平均粒径时,是基于体积加权的方法,表征液滴平均速度时,却使用了数量加权的方法。基于不同原理的等效方法本身存在很大的差异,而且计算出的等效指标也侧重于表征液滴的不同特性。等效方法混用虽然不合理,但却经常出现,究其原因是等效指标计算方法不完善,等效指标缺失。比如广泛使用的基于体积加权的液滴等效粒径,就没有与之配套的基于体积加权的液滴等效速度,导致学者不得不使用其他等效方法来描述液滴速度。所以这种基于能量的等效指标计算方法应具有能表征液滴速度和粒径的功能。

综上,本研究的目的在于:1)从能量加权角度提出一种表征喷洒液滴等效指标的计算方法;2)对比能量加权方法与其他类型等效方法的计算结果,阐明不同方法表征喷洒液滴平均特征的特点和差异;3)建立能量加权等效指标与其他类型指标的回归关系,为能量加权等效指标的应用提供指导,为更全面地从能量角度反映喷洒

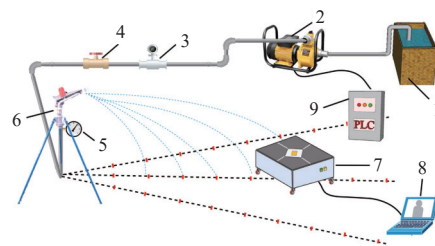
液滴的平均特征提供思路。

1 材料与方法

1.1 液滴粒径和速度测试试验

1.1.1 试验平台

建立如图 1 所示的喷洒液滴测试平台。水源由水箱供应,变频柜调节水泵压力,喷头流量由电磁流量计(EMF5000,精度 0.5%)测量,喷头工作压力由喷头下方 0.2 m 处的 YB150 型的精密压力表(0~1.0 MPa,精度 0.1%)测量。为减少蒸发,试验于傍晚或清晨在西北农林科技大学旱区节水农业研究院操场进行,场地平整,微风(平均风速<1.0 m/s),试验期间温度范围为 22.6~27.2℃。



1. 水箱 2. 水泵 3. 电磁流量计 4. 阀门 5. 压力表 6. 喷头 7. 视频雨滴谱仪 8. 笔记本电脑 9. 变频调压柜
1. Water tank 2. Water pump 3. Electromagnetic flow meter 4. Valve 5. Pressure gauge 6. Nozzle 7. Two-dimensional video distrometer 8. Laptop 9. Inverter pressure regulator cabinet

图 1 喷洒液滴粒径和速度测试平台

Fig.1 Test platform of spray droplet diameter and velocity

1.1.2 试验方案

提出等效指标计算方法是为了更好地描述喷洒液滴分布规律。为探究不同等效指标计算方法在描述不同类型喷头喷洒液滴分布特性的差异,本研究选用了 5 种不同类型的喷头,分别为非旋转折射式喷头 D3000、旋转折射式喷头 R3000、震荡式喷头 IWOB、摇臂式喷头 ZY-2 和涡轮蜗杆式喷头 HY50。试验时喷头都处于额定工况,具体工况参数如表 1 所示。

表 1 5 种类型喷头的工作参数

Table 1 Operating parameters of the five types of spray nozzles

喷头类型 Nozzle type	工作压力 Working pressure/MPa	流量 Flow rate/(m ³ ·s ⁻¹)	射程 Spray range/m	喷嘴直径 Nozzle diameter/mm	安装高度 Installation height/m	测点位置 Location of measurement points
D3000	0.15	2.21	8.8	6.8	1.7	1.2~7.2 m, 间隔 1.2 m
R3000	0.15	2.32	8.8	6.8	1.7	1.2~7.2 m, 间隔 1.2 m
IWOB	0.15	2.27	8.8	6.8	1.7	1.2~7.2 m, 间隔 1.2 m
ZY-2	0.40	3.54	18.9	7.0 (主), 3.1 (副)	1.7	2~18 m, 间隔 2 m
HY50	0.45	28.69	39.9	18.0	1.7	4~32 m, 间隔 4 m

液滴微物理特性由奥地利 Joanneum Research 公司生产的视频雨滴谱仪(two-dimensional video distrometer, 2DVD)测量,仪器工作时,垂直放置在内部的 2 台相机对经过测试区域(100 mm×100 mm)的水滴进行线性扫描。将 2DVD 布置在喷洒域内以喷枪为起点的 1 条射线上。以测试 ZY-2 喷头喷洒液滴特性为例,如图 1 所示,从距离喷枪 2 m 距离处开始,沿射线方向每隔 2 m 布置 1 个测点,共 9 个测点。待喷头工作压力稳定后,将 2DVD 沿射线移动至每个测点处,测试时长为 10 min。使用笔记本记录每个测点处所有液滴的粒径及速度。

1.2 基于能量加权的等效液滴指标计算方法

在考虑液滴数量和体积的前提下,引入了衡量液滴能量的另一物理指标——速度,构建基于能量加权的液滴等效指标计算体系。

2DVD 测试单个液滴落地时的直径和速度,通过式

(1) 计算液滴落地时的动能^[16]。

$$K_{ed} = \frac{1}{12} \pi \rho_w D_n^3 v_n^2 \quad (1)$$

式中 K_{ed} 为液滴动能, J; ρ_w 为水的密度, kg/m³; D_n 为序号为 n 的液滴的落地粒径, m; v_n 为序号为 n 的液滴的

落地速度, m/s。

通过式 (2) 计算喷头各个测点处所有液滴动能之和与液滴总体积的比值, 即单位体积水滴动能。

$$K_{ev} = \frac{\sum_{l=1}^n \frac{1}{12} \pi \rho_w D_{fl}^3 v_{fl}^2}{1000 \sum_{l=1}^n \frac{1}{6} \pi D_{fl}^3} \quad (2)$$

式中 K_{ev} 为水滴单位体积动能, J/L; n 为测点处的液滴总数; l 为测点处液滴的序列数, $l=1, 2, \dots, n$ 。

水流从喷嘴射出后, 沿喷洒径向破碎为数量众多, 大小不同的液滴, 液滴对土壤表面的破坏通常是由雨滴打击能量决定的^[4]。因此, 测点位置处液滴等效指标应能反映出液滴能量的概念, 故喷洒液滴等效落地速度应满足式 (3)。

$$\frac{1}{12} \pi \rho_w D_E^3 v_E^2 = \frac{\left(\frac{1}{12} \pi \rho_w D_{f1}^3 v_{f1}^2 \right)^2}{\sum_{l=1}^n \frac{1}{12} \pi \rho_w D_{fl}^3 v_{fl}^2} + \frac{\left(\frac{1}{12} \pi \rho_w D_{f2}^3 v_{f2}^2 \right)^2}{\sum_{l=1}^n \frac{1}{12} \pi \rho_w D_{fl}^3 v_{fl}^2} + \dots + \frac{\left(\frac{1}{12} \pi \rho_w D_{fn}^3 v_{fn}^2 \right)^2}{\sum_{l=1}^n \frac{1}{12} \pi \rho_w D_{fl}^3 v_{fl}^2} \quad (5)$$

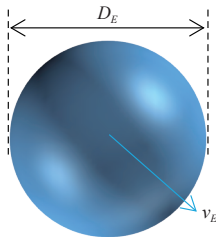
联立式 (4) ~ 式 (5) 可得基于能量加权的等效液滴直径计算式 (6)。

$$D_E = \sqrt[3]{\frac{\sum_{l=1}^n D_{fl}^6 v_{fl}^4}{\sum_{l=1}^n D_{fl}^3 v_{fl}^2}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\sum_{l=1}^n D_{fl}^3}{\sum_{l=1}^n D_{fl}^3 v_{fl}^2}} \quad (6)$$

定义了如图 2 所示的“等效液滴”, 式 (4) 计算的等效液滴速度和式 (6) 计算的等效液滴直径分别是“等效液滴”的 2 个物理特征指标, 由式 (7) 计算等效液滴动能。

$$K_E = \frac{1}{12} \pi \rho_w D_E^3 v_E^2 \quad (7)$$

式中 K_E 为等效液滴动能, J。



注: D_E 为基于能量加权的粒径, m; v_E 为基于能量加权的速度, $m \cdot s^{-1}$ 。
Note: D_E is particle diameter, m; v_E is velocity, $m \cdot s^{-1}$. Both are energy-weighted.

图 2 等效液滴示意图
Fig.2 Equivalent droplet diagram

1.3 数据处理

汇总不同类型的液滴等效指标, 其中, 等效粒径有基于数量加权的等效液滴直径 (D_N)、基于液滴数量分布累积频率曲线的中值粒径 (D_{N50})、基于体积加权的等效液滴直径 (D_V)、基于液滴体积分布累积频率曲线的中值粒径 (D_{V50}) 和基于能量加权的等效液滴直径 (D_E)。等效速度有基于数量加权的等效液滴速度

$$K_{ev} = \frac{\frac{1}{12} \pi \rho_w D_E^3 v_E^2}{1000 \times \frac{1}{6} \pi D_E^3} \quad (3)$$

式中 v_E 为基于能量加权的等效液滴速度, m/s; D_E 为基于能量加权的等效液滴粒径, m。

联立式 (2) ~ 式 (3), 可得基于能量加权的等效液滴速度为式 (4)。

$$v_E = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^n D_{fl}^3 v_{fl}^2}{\sum_{l=1}^n D_{fl}^3}} \quad (4)$$

能量加权平均法是以单个液滴能量占总能量的比例权重计算测点处的能量加权等效指标, 计算式如下:

(v_N)、基于液滴数量分布累积频率曲线的中值速度 (v_{N50})、经验公式 I ($v_T(D_V)$)^[6, 12-14]、经验公式 II ($v_{eq}(D_V)$)^[6] 和基于能量加权的等效液滴速度 (v_E)。

2 结果与分析

2.1 液滴粒径和速度

图 3 为基于 2DVD 的 5 种类型喷头喷洒液滴粒径和速度沿径向测点的分布特征。从液滴落地特征的测试结果来看, 所有喷洒测点处的最小液滴粒径约为 0.10 mm, 这是因为 2DVD 的粒径测试范围为 0.10~10 mm^[16]。液滴通过 100 mm×100 mm 的测试区域时, 可捕捉到的液滴最小速度约为 0.55 m/s, 这是因为 2DVD 两台摄像机线扫描频率约为 55 kHz。不同测点处液滴最大粒径和最大速度存在较大差异, 一方面是由于 5 种类型喷头的流量、工作压力、液滴破碎机制等存在差异^[7, 18]。另一方面是因为 2DVD 获取的测试数据中液滴数目众多, 大量液滴通过测量区域时, 轨迹交叉重叠容易导致液滴相互碰撞, 发生破碎分裂或融合重组, 进一步减小或增加液滴的测量粒径和速度。以 D3000 喷头 1.2 m 测点处的 50 919 个液滴的速度测试数据为例, 液滴最大速度为 47.42 m/s, 但该速度却是粒径仅为 0.35 mm 的液滴携带的。显然, 该结果可能是由于液滴裂变或仪器测量误差导致的^[9, 19]。

虽然不可避免的存在一些异常点, 但它们对数量庞大的液滴数据群而言, 影响微不足道。不同类型喷头喷洒液滴粒径和速度的总体趋势是: 1) D3000、R3000 和 IWOB 喷头的喷洒液滴平均粒径和平均速度沿射程方向均呈先增大再减小的趋势; ZY-2 和 HY50 喷头的平均粒径和平均速度沿射程方向波动变化。2) 如表 2 所示, 喷头射程前段的测点液滴数目较多, 液滴粒径和速度的分布较为集中; 射程中后段的测点液滴数目较少, 液滴粒径和速度的分布范围较大。

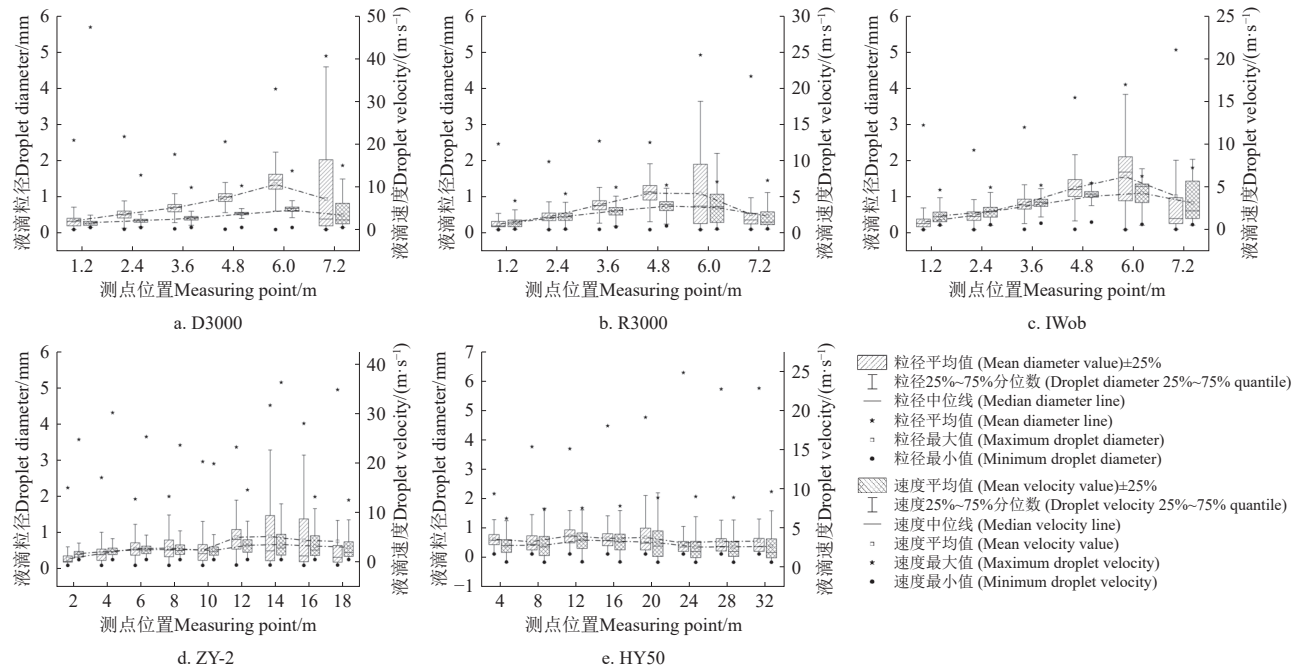


图3 基于2DVD的5种类型喷头喷洒液滴粒径和速度沿径向测点的分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of droplet diameter and velocity along radial measurement points for 5 types of spray nozzles based on 2DVD

表2 基于2DVD的5种类型喷头在不同测点处的喷洒液滴数目

Table 2 Number of droplets sprayed at different measurement points for 5 types of nozzles based on 2DVD

序号 No.	D3000	R3000	IWOB	ZY-2	HY50
1	50 919	124 756	109 534	66 457	28 402
2	17 921	84 452	31 651	65 601	22 441
3	13 235	22 870	14 077	22 179	31 610
4	14 029	5 374	4 729	19 020	47 614
5	19 462	3 027	1 740	22 496	28 675
6	56 453	274	1 497	4 603	21 822
7	0	0	0	2 256	16 938
8	0	0	0	2 573	12 882
9	0	0	0	1 283	0

2.2 等效液滴速度的比较

基于5种等效液滴速度计算方法,得到了5种类型喷头在各自额定工况下不同测点处的等效液滴速度,如图4所示。基于液滴数量加权的等效液滴速度和基于数量分布累积频率曲线的中值速度是与液滴数量有关的等效方法;经验公式I是ATLAS等^[12]提出的天然降落雨滴的终端速度;经验公式II是GE等^[6]提出的喷洒液滴落地速度的对数函数拟合关系式;基于液滴能量加权的液滴等效速度可由式(4)计算。因此,这5种等效方法从计算原理上可分为3类,分别与经验回归、液滴数量和能量相关。

从图4可知,与液滴数量相关的2种等效速度普遍小于其他3种等效速度,这是因为每个测点处小液滴都占据了较大比例,小液滴的速度普遍都比较小,就会导致等效速度更偏向表征小液滴的速度特征。随着距喷头距离的增大,与液滴数量相关的2种等效速度呈先增大再减小的趋势,最大值都不超过5 m/s。其中D3000、R3000和IWOB这3种低压喷头在喷洒射程的中后段,液滴等效速度达到峰值。而ZY-2喷头在射程中前段和中后段分别有1个峰值, HY50喷头在射程中前段出现

峰值。结合喷头的喷洒特性分析,这是因为低压喷头的水量主要集中在射程的中后段。ZY-2是由主副2个喷嘴同时喷洒的摇臂式喷头,主喷嘴直径为7.0 mm,流量较大,主要向远端喷洒,副喷嘴直径为3.1 mm,流量较小,主要向近端喷洒。HY50是蜗轮蜗杆式喷头,在喷嘴出口处,设置有分水盘,射流冲击驱动分水盘转动,在喷洒近端产生大量旋转破碎的小液滴。

从整体趋势来看,基于能量加权的液滴等效速度公式、经验公式I和经验公式II的计算结果具有较为一致的增减性。自然降雨的生成机制和运动轨迹都和喷灌水滴滴存在较大差异。从高空落下的自然降雨具有较大的垂直速度^[7],而下落高度远小于自然降雨的喷灌水滴滴,很可能是以较大的水平方向分速度来弥补了垂直方向分速度的不足,最终使2种液滴的动能接近相同。从等效速度偏差率来看,天然降雨和喷灌水滴滴仍存在一定差异。以中高压喷头HY50和低压喷头IWOB为例,经验公式I和基于能量加权的液滴等效速度公式最大偏差率分别出现在射程中前段和射程末段,最大值分别为-23.1%和23.9%。

经验公式II中的液滴落地速度从本质上来说是和能量加权有关的。GE等^[6]中液滴能量 $E_k(d)$ 和径向水量分布曲线 $p(d)$ 是通过试验获得的,已知降水强度和水滴动能,基于动能定理反向求解得到沿射程方向若干个 $v_{eq}(D_v)$ 的计算值。在描述喷洒液滴的等效速度时,GE等^[6]认识到目前缺乏一个合理的指标,所以引入了动能定理,将等效速度与液滴能量关联起来。但并没有更进一步,通过理论推导得出基于能量加权的液滴等效速度计算公式,而是直接建立了试验得到的液滴等效速度和基于体积加权等效粒径之间的经验公式。经验公式II是针对50PYC喷头建立的,应用范围受到喷头种类、工作压力、安装高度等因素的限制,与理论公式相比其普适

性不足。应用在 D3000、R3000、IWOB、ZY-2 和 HY50 喷头时, 经验公式 II 和基于能量加权的液滴等效速度公式最大偏差率分别达到 14.4%、-41.9%、23.8%、-54.8%

和-9.8%。HY50 喷头和 ZY-2 喷头偏差率较小的原因可能是这 2 种喷头的额定工作压力都处在中高压压力范围, 且试验时的喷头安装高度都是 1.7 m。

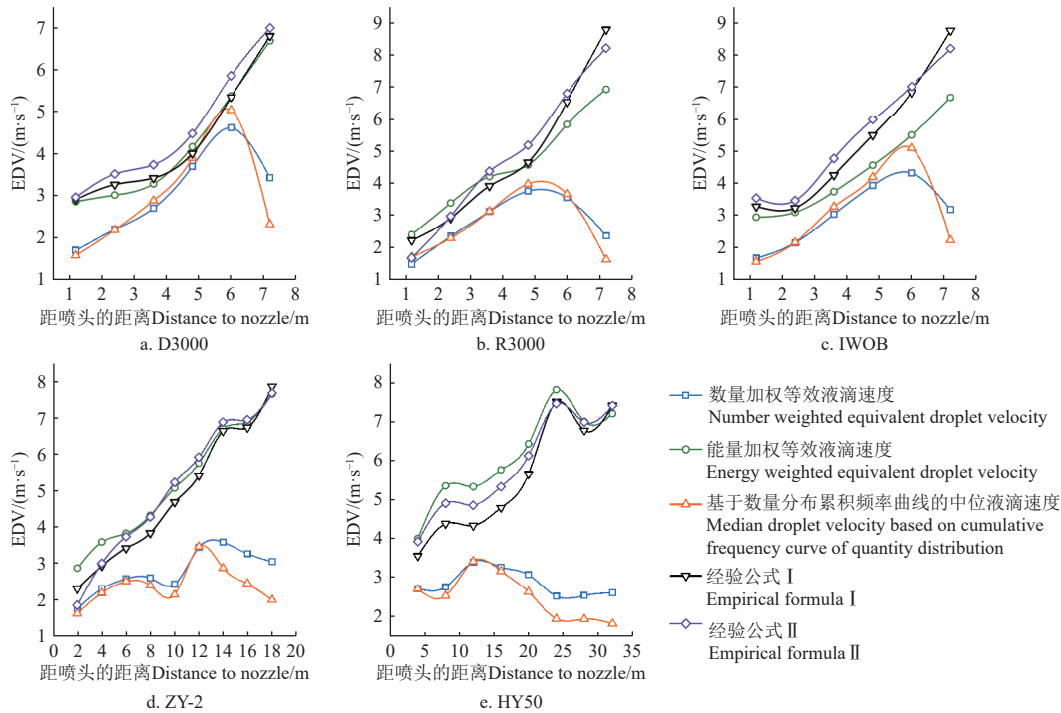


图 4 5 种类型喷头在不同测点处的液滴等效速度
Fig.4 Equivalent droplet velocity (EDV) at different measurement points for 5 types of nozzles

2.3 等效液滴粒径的比较

基于 5 种等效液滴粒径计算方法, 得到了 5 种类型喷头在各自的额定工况下, 不同测点处的等效粒径, 如图 5 所示。基于数量加权和数量累积频率曲线的等效粒径是与液滴数量有关的等效方法; 基于体积加权和体积累积频率曲线的等效粒径是与液滴体积有关的等效方法, 基于能量加权的等效粒径是与液滴能量有关的等效方法。因此, 这 5 种等效方法从计算原理上可分为 3 类, 分别与液滴数量、体积和能量相关。

喷洒水落到地面时, 小液滴占测点处水滴总数的比例很高^[6, 19]。所以与液滴数量相关的等效粒径就会更偏向数量贡献率更高的液滴。小液滴体积占总体积的比例很小, 所以采用与液滴体积有关的等效指标时, 等效粒径值会偏向体积贡献率较高的大液滴。液滴动能的大小取决于液滴粒径和速度, 通常来说, 大粒径液滴携带着较大的动能, 所以采用与液滴能量有关的等效指标时, 等效粒径值会偏向能量贡献率较高的大液滴。观察这 3 类方法计算的液滴等效粒径数值大小可知 (图 5), 基于能量加权的等效液滴粒径最大, 其次是与液滴体积相关的等效方法, 最小的是与液滴数量相关的等效方法。这表明能量贡献率较高的液滴粒径最大, 体积贡献率较高的液滴粒径次之, 数量贡献率较高的液滴粒径最小。

根据图 5 中液滴等效粒径沿径向的变化趋势来看, 随着距喷头距离的增大, D3000、R3000 和 IWOB 这 3 种喷头与数量有关的液滴等效粒径呈先增大再减小的趋势。D3000、R3000 和 IWOB 这 3 种喷头是大型喷灌机上常

用的低压喷头^[20], 额定工作压力通常小于 200 kPa, 喷洒液滴主要集中降落在中远端。而单位面积内降落的液滴数目越多, 液滴发生碰撞合并的概率越大, 所以与数量相关的液滴等效粒径最大值出现在中远端。ZY-2 喷头的主副喷嘴分别保证了远端和近端液滴数量分布的相对均匀, HY50 喷头的射流被分水盘破碎后, 在近端产生了大量小粒径的液滴。因此, ZY-2 和 HY50 这 2 种喷头沿射程方向都是小粒径的液滴占据较大比例, 与数量有关的液滴等效粒径基本保持在 0~1 mm, 未出现较大波动。

从图 5 可知, 与能量和体积相关的液滴等效粒径沿径向的整体变化趋势较为相似, 但在喷洒近端却存在明显的差异。以 D3000、R3000、IWOB、ZY-2 和 HY50 这 5 种喷头的第 1 个测点为例, 基于能量加权的液滴等效粒径在数值上比基于体积加权的液滴等效粒径分别增加了 55.8%、67.4%、50.6%、67.2% 和 42.3%。这是因为虽然在喷头近端粒径较小的液滴占据较大比例, 但也存在一定数量的大粒径液滴, 这些液滴从喷嘴出口射出后, 未经过充分破碎就陡降到地面。由于大粒径液滴携带了较大的动能, 对测点处的能量贡献率较高, 所以基于能量加权的液滴等效粒径更偏向于这部分大液滴。以 D3000、R3000、IWOB、ZY-2 和 HY50 这 5 种喷头在喷洒远端的最后 1 个测点为例, 基于能量加权的等效液滴粒径在数值上比基于体积加权的等效液滴粒径分别增加了 9.9%、9.3%、8.2%、18.5% 和 33.2%。这表明 ZY-2 和 HY50 中高压喷头, 比 D3000、R3000 和 IWOB 低压喷头末端液滴携带的能量更大, 对土壤产生的破坏程度更大。

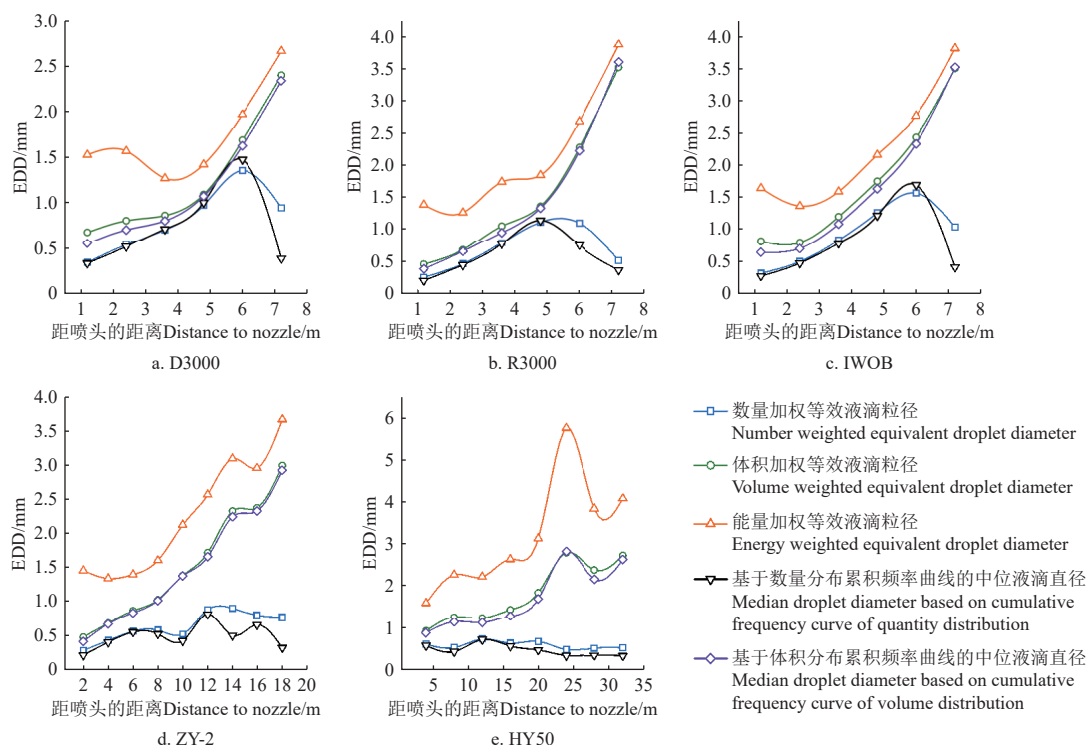


图5 5种类型喷头在不同测点处的液滴等效粒径

Fig.5 Equivalent droplet diameter (EDD) at different measurement points for 5 types of nozzles

2.4 等效液滴速度的代表性分析

基于图3所示的5种类型喷头在其额定工作压力下的液滴测试数据,沿每种喷头射程方向上随机选取一个测点,D3000(6.0 m)、R3000(3.6 m)、IWOB(4.8 m)、ZY-2(10.0 m)、HY50(16.0 m),绘制液滴速度的数量分布直方图、液滴数量和能量的累积频率曲线图,如图6所示。

从液滴速度的数量分布直方图可看出,速度小于6 m/s的液滴占到液滴总数的90%以上,5种类型喷头的液滴落地速度基本满足正态分布曲线。图6中横坐标所示的液滴速度范围内,数量累积频率曲线的整体变化速率大于能量累积频率曲线。能量累积频率增长速率较慢是因为速度较小的液滴比例较大,能量与速度的平方有关,速度越小,对能量的贡献率越小。

由图6可知,基于数量加权和能量加权的等效液滴速度计算值分别对应各自累积频率曲线上某一确定的累积频率值。以ZY-2喷头为例,10.0 m测点处 v_N 对应59.6%的数量累积频率, v_E 则对应25.6%的能量累积频率。在不同工况的喷洒液滴中,基于数量加权的等效液滴速度对应的数量累积频率波动性较大,基于能量加权的等效液滴速度对应的能量累积频率则更为稳定。说明在任意液滴群体中,基于能量加权的等效液滴速度更能稳定代表某个固定累积频率的液滴速度。

由图6,不同工况下,数量加权的等效速度均小于能量加权的等效速度,并且基本位于数量分布直方图中数量较多的液滴速度区间段。以IWOB喷头为例,数量加权的等效速度为3.93 m/s,对应的液滴数量累积频率为29.7%,但能量累积频率仅为4.5%。也就是说,其余速度大于3.93 m/s的液滴数量占比为70.3%,对总能量的贡献率为95.5%,因此,等效速度更应该表征这部分

液滴的速度特征。基于能量加权的等效液滴速度为4.55 m/s,小于该速度的液滴数量携带了约43.8%的能量,大于该速度的液滴数量约为21.4%,能量加权速度介于最大速度和数量加权的等效液滴速度之间,代表了携带能量较多的大液滴的速度特征。

2.5 等效液滴粒径的代表性分析

为对应液滴速度的累积频率曲线图,每种喷头测点选取与2.4节保持一致,绘制如图7所示的液滴粒径的数量分布直方图、液滴数量、体积和能量的累积频率曲线图。

图7中横坐标表示的液滴粒径范围内,3条累积频率曲线整体变化速率从大到小的顺序是数量累积频率曲线、体积累积频率曲线和能量累积频率曲线。从液滴粒径的数量分布直方图可看出,所有测点处粒径小于1.5 mm的液滴占到液滴总数的50%以上。但这些小粒径液滴的体积对总水量贡献率较小^[18]。从喷灌和自然降雨液滴落地速度的研究可知,液滴粒径与液滴落地速度符合某种函数关系,液滴粒径越小,其落地速度也很小,所以小液滴对总能量的贡献率会更小。

从5个测点处液滴不同等效粒径的数值来看,能量加权的液滴等效粒径处于液滴粒径范围的中后段,体积加权的液滴等效粒径处于液滴粒径范围的中段,数量加权的液滴等效粒径处于液滴粒径范围的前段。以图7e为例,数量加权的液滴等效粒径为0.63 mm,该粒径对应的液滴体积和能量累积频率曲线水平都较低,显然,数量加权等效粒径不能表征出对总水量和总能量贡献率大的那部分液滴的粒径特性。基于体积加权的液滴等效粒径为1.43 mm,粒径小于1.43 mm的液滴数量虽然超过95%,贡献了58.7%的水量,但从能量累积频率曲线来看,这部分液滴携带了大约38.6%的能量。如果把这

38.6% 的能量平均到每个粒径小于 1.43 mm 的液滴上, 那单个液滴的能量就会更小。反之, 粒径大于 1.43 mm 的液滴, 数量不足 5%, 但这些液滴却携带了大约 61.4% 的能量。如果把这 61.4% 的能量平均到每个比 1.43 mm 大的液滴上, 单个液滴的能量就不容小觑, 这些液滴对土壤表面和作物叶片的打击力就远大于那些小液滴, 所

以液滴的等效粒径更应该反映这些大液滴的特征。基于能量加权的液滴等效粒径为 2.62 mm, 小于该粒径的液滴携带了约 87.9% 的能量, 大于该粒径的液滴数量不足 0.1%, 携带了剩余约 12.1% 的能量。该粒径介于最大粒径和体积加权的液滴等效粒径之间, 代表了携带能量较多的大液滴的粒径特征。

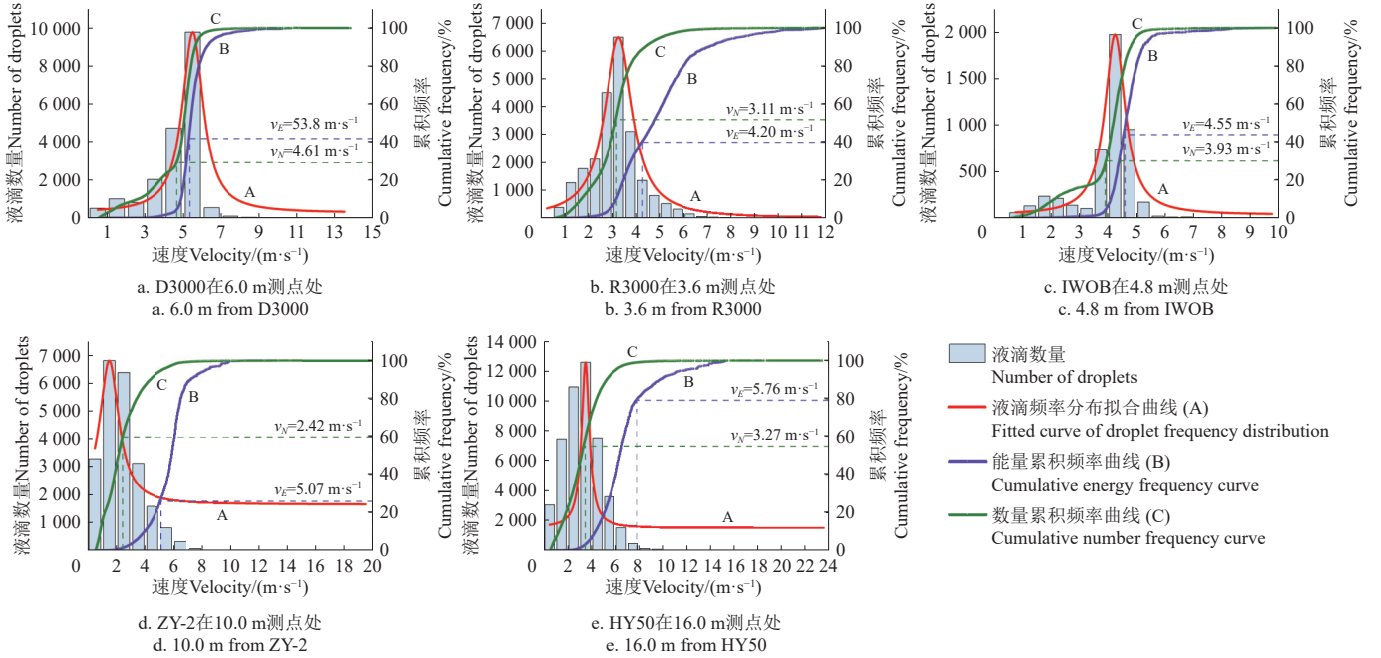
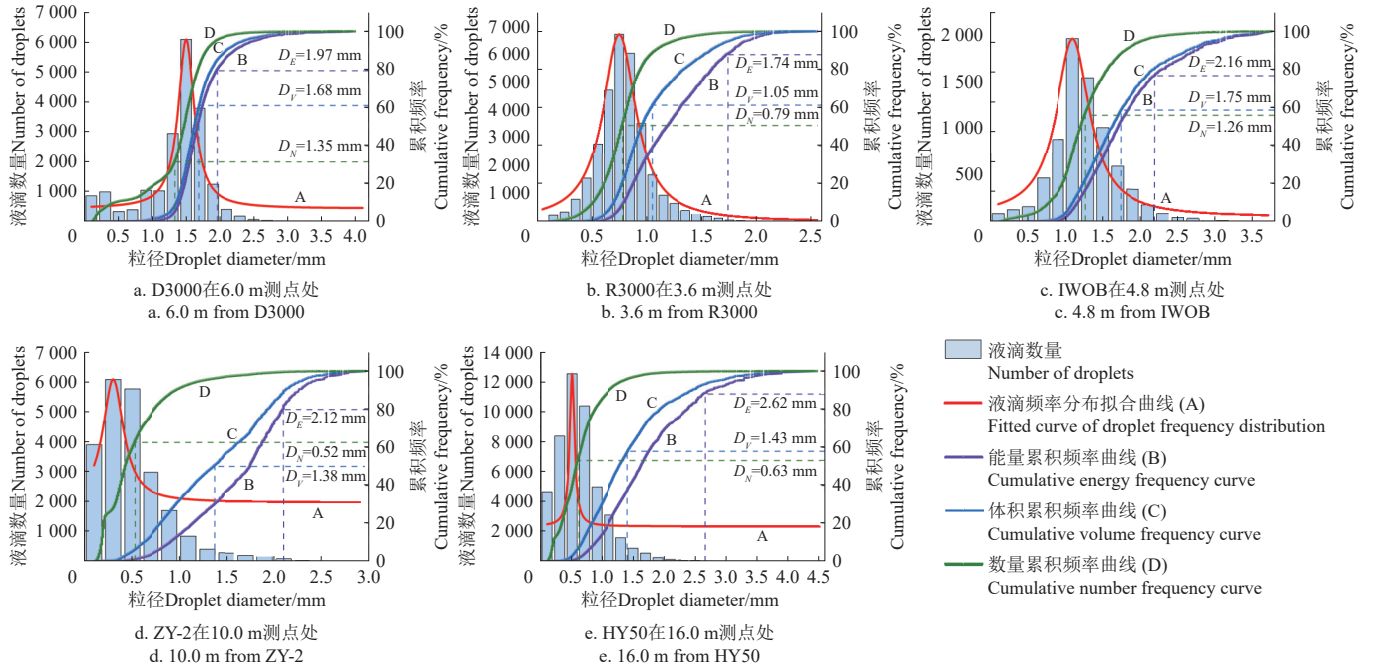


图 6 液滴速度的数量分布直方图及数量和能量的累积频率曲线图

Fig.6 Histogram of the number distribution of droplet velocity and cumulative frequency graphs of number and energy



注: D_N 为基于数量加权的直径, D_V 为基于体积加权的直径。

Note: D_N is quantity-weighted diameter; D_V is volumetric-weighted diameter.

图 7 液滴粒径的数量分布直方图及数量、体积和能量的累积频率曲线图

Fig.7 Histogram of the number distribution of droplet diameter and cumulative frequency graphs of number and energy

3 讨论

3.1 等效液滴指标之间的关系

基于能量加权的等效指标需要用到液滴速度, 而液

滴速度的测量需要用到如 2DVD 或激光雨滴谱仪 (laser precipitation monitor, LPM) 这类价格昂贵的光学仪器, 很多实验室并不具备这些条件^[21]。因此, 大部分关于喷洒液滴微物理特性的研究仅涉及液滴粒径, 主要采用的

测试方法是面粉法、色斑法、压电传感器等^[16]。这类方法成本低廉、操作简单,但收集到的液滴样本数量小,代表性不强,且无法测试液滴速度,导致难以使用基于能量加权的等效指标计算方法。为方便基于能量加权等效液滴指标计算方法的推广应用,加强公式普适性,分别建立基于能量加权的等效液滴指标与其他类型等效指标之间的回归关系。

如图 8 所示为基于能量加权的等效速度与其他等效速度的关系。与数量有关的等效速度与 v_E 无明显的相关关系,但液滴的终端速度与 v_E 存在较好的指数回归关系,决定系数均大于 0.8,说明在液滴速度不易测量的条件下,可以通过面粉法、色斑法、压电传感器等直接测试喷洒液滴粒径,计算 D_V ,进而得到 $v_{eq}(D_V)$ 或 $v_T(D_V)$,再根

据 $v_{eq}(D_V)$ 或 $v_T(D_V)$ 与 v_E 的回归关系,求解 v_E 。

基于能量加权的等效粒径与其他等效粒径的关系如图 9 所示,与数量有关的等效粒径与 D_E 无显著的相关关系。李久生^[22]测试中原 12Y 喷头喷洒液滴分布特征时发现,随着距喷头距离或工作压力的增加,用 D_N 和 D_{N50} 计算的平均水滴直径时大时小,变化规律都不明显。徐红等^[15]探究 ZY 系列摇臂旋转式喷头水滴直径分布时提出,水滴直径沿射程方向呈现出规律性最好的是 D_V 和 D_{V50} ,其次是 D_N ,最差的是 D_{N50} 。图 9c 和图 9d 中,与体积有关的等效粒径与 D_E 存在较好的指数回归关系,决定系数均大于 0.8。在液滴速度不易获得的条件下,也可以通过直接测试喷洒液滴粒径,计算 D_V 或 D_{V50} ,求解 D_E 。

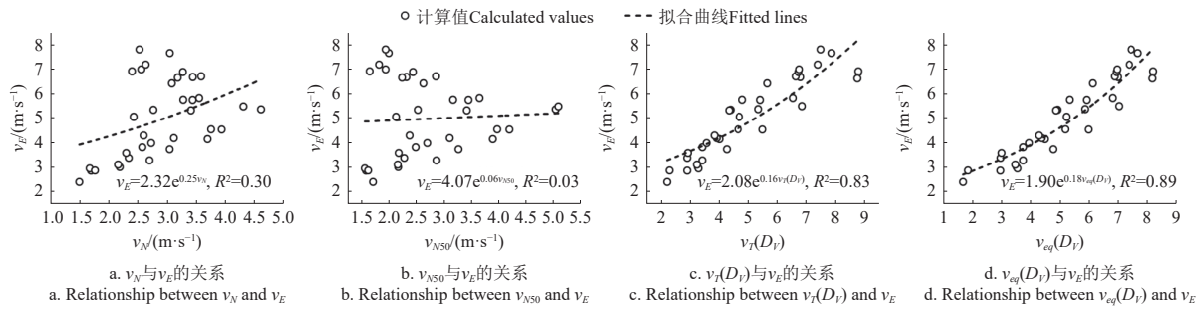


图 8 基于能量加权的等效速度与其他等效速度的关系

Fig.8 The relationship between energy weighted equivalent velocity and other equivalent velocities

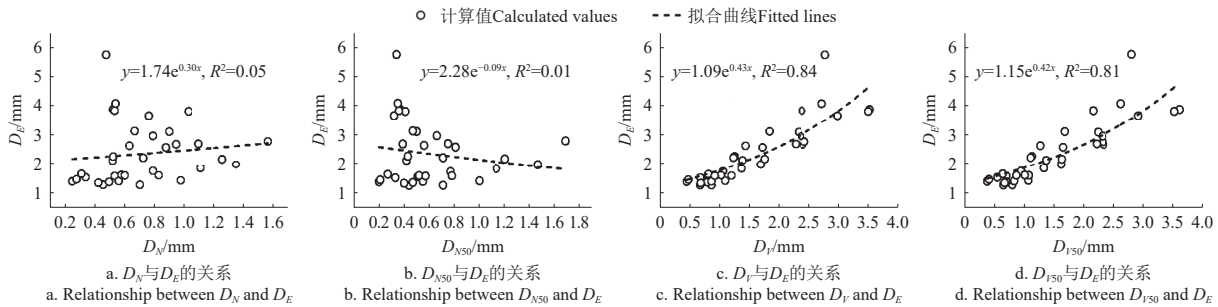


图 9 基于能量加权的等效粒径与其他等效粒径的关系

Fig.9 The relationship between energy weighted equivalent diameter and other equivalent diameters

3.2 等效液滴能量表征喷灌液滴动能的有效性分析

动能强度,即单位时间和单位面积的降水动能,是广泛用于表示影响土壤流失和产沙的降雨侵蚀力的变量^[14,23]。大量学者研究表明,降雨动能与降雨强度存在指数关系、幂函数关系、对数关系和多项式关系等。但降雨动能受降雨类型、下垫面地形变化和大气风速等要素的影响,时空差异较大,上述经验公式在应用推广上存在一定的局限性^[24]。为此,马廷等^[25]提出将整个降雨过程看作由多个自由下落,大小各异的独立雨滴组成。利用雨滴谱函数来描述降雨中所包含的不同大小雨滴的分布情况,建立了基于雨滴谱函数和雨滴终点速度的降雨动能理论计算模型。CAROLLO 等^[14]研究发现动能与降雨强度的比值严格依赖于中位数体积直径 D_{V50} 。平均粒径一定程度上可以简化和代表雨滴谱函数中典型液滴的特征,但该研究并未揭示动能与液滴等效速度的关系。

本文提出的基于能量加权的等效指标中同时包含等效液滴速度和粒径,以此为基础可探究等效液滴能量在

表征降雨动能时的有效性。图 10 为等效液滴能量与动能强度的关系,由图 10 可知:基于能量加权的等效液滴动能可以较好地估计动能强度,对数回归关系的决定系数为 0.84,说明能量加权的等效液滴粒径和速度可以分别代表雨滴粒径谱和速度谱的平均特征。此外,若不便使用 2DVD 或 LPM 光学仪器,可以采用基于能量加权等效液滴速度和粒径与其他等效指标的回归关系,间接求解等效液滴能量,进而获得动能强度预测值。

3.3 不足与展望

本研究从能量加权的角度提出了喷洒液滴等效速度和粒径的计算方法,但前人使用的喷洒液滴等效计算方法大多是基于数量加权或体积加权的思路。归纳总结发现,加权算法中存在明显的等效指标缺失现象,如广泛使用的基于体积加权的等效粒径,却无配套使用的基于体积加权的等效速度^[6,8]。因此,后续研究中可以进一步完善不同类型加权算法,提出更多的等效指标弥补行业空白。此外,喷洒液滴相对于自然降雨最大的区别是液

滴落地角度, 合理表征喷洒液滴的等效落地角度也是完善能量加权等效指标体系的关键。

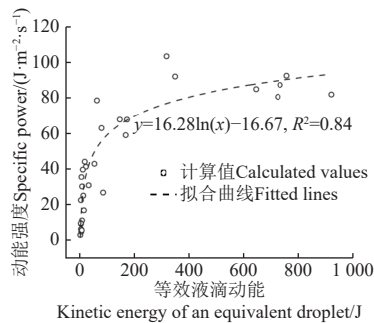


图 10 等效液滴能量与动能强度的关系

Fig.10 Relationship between equivalent droplet energy and specific power

在喷灌领域, 常用雾化程度作为评价洒水在空中裂散程度的指标, 但原有雾化指标并未将二次破碎纳入考虑, 随着喷头种类的增多, 喷嘴喷出的水可能经过喷盘折射或摇臂破碎^[5, 7, 20]。通过液滴等效粒径沿射程的分布来表示洒水水滴的雾化效果, 进而衡量喷头的洒水质量的方法更为合理。测试喷头洒水效果或改进喷头结构时, 可以采用基于能量加权的等效液滴速度和粒径指标, 表征喷洒液滴的碎裂程度和降落动能, 进而衡量喷头的雾化和打击效果。等效粒径越小, 雾化程度越高, 喷洒液滴的破碎效果越好, 对作物或土壤的打击能力越小。本研究的等效对象是喷头喷洒液滴, 在衡量自然(模拟)降雨对土壤侵蚀的作用时, 也可以尝试采用这种等效指标。

4 结 论

本研究使用了 5 种常用类型喷头, 以喷洒液滴等效指标为研究对象, 提出一种从能量加权角度表征喷洒液滴等效指标的计算方法。将能量加权方法与其他类型等效方法的计算结果进行对比; 建立能量加权等效指标与其他类型指标的回归关系, 讨论能量加权等效指标的用途。主要结论如下:

1) D3000、R3000 和 IWOB 喷头的喷洒液滴平均粒径和平均速度沿射程方向均呈先增大再减小的趋势; ZY-2 和 HY50 喷头的平均粒径和平均速度沿射程方向波动变化;

2) 基于能量加权的等效液滴粒径最大, 其次是与液滴体积相关的等效方法, 最小的是与液滴数量相关的等效方法。能量加权等效方法计算的液滴等效速度和等效粒径可以表征出能量贡献率高的液滴的特征。

3) 经验公式计算的液滴终端速度与能量加权等效液滴速度存在较好的指数回归关系, 和体积有关的等效粒径与能量加权等效液滴粒径存在较好的指数回归关系, 决定系数均大于 0.80; 基于能量加权的等效液滴动能可以较好地估计单位时间和单位面积的降水动能, 对数回归关系的决定系数为 0.84。不便使用精密光学仪器时, 可以采用回归公式得到的基于能量加权等效液滴速度和粒径与其他等效指标的回归关系, 间接求解等效液滴能量, 进而获得单位面积和单位时间的降水动能, 为评估喷灌液滴侵蚀力提供依据。

[参 考 文 献]

- [1] ZHU Z R, ZHU D L, GE M S. Effects of irrigation characteristics and plant morphological features on interception of sprinkler water by maize plants[J]. *Irrigation Science*, 2022, 41(3): 337-353.
- [2] MATTAR M A, ROY D K, AL-GHOBARI H M, et al. Machine learning and regression-based techniques for predicting sprinkler irrigation's wind drift and evaporation losses[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 265: 107529.
- [3] ZHANG R, ZHENG C, ZHU D, et al. Variation in sprinkler irrigation droplet impact angle on the physical crusting properties of soils[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 289: 108514.
- [4] 陈瑞, 陈晓芳, 李红, 等. 间歇和连续喷灌下土壤水分运动特征 COMSOL 数值模拟与验证[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(6): 237-247.
- CHEN Rui, CHEN Xiaofang, LI Hong, et al. COMSOL numerical simulations and experiments of soil water movement under intermittent and continuous sprinkler irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(6): 237-247. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王子鑫, 蒋跃, 潘绪伟, 等. 射流撞击式低压喷头设计与水力性能试验[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(6): 220-227.
- WANG Zixin, JIANG Yue, PAN Xuwei, et al. Design and hydraulic performance test of a jet-impingement sprinkler at low pressure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(6): 220-227. (in Chinese with English abstract)
- [6] GE M S, WU P T, ZHU D L, et al. Analysis of kinetic energy distribution of big gun sprinkler applied to continuous moving hose-drawn traveler[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 118132.
- [7] GE M S, WU P T, ZHU D L, et al. Comparisons of spray characteristics between vertical impact and turbine drive sprinklers-a case study of the 50PYC and HY50 big gun-type sprinkler[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 228: 105847.
- [8] JIANG Y, LIU J L, LI H, et al. Droplet distribution characteristics of impact sprinklers with circular and noncircular nozzles: Effect of nozzle aspect ratios and equivalent diameters[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 174: 316-328.
- [9] 张锐, 刘一川, 朱德兰, 等. 考虑射流破碎和液滴形状的喷灌水运动轨迹改进模型构建及验证[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(5): 43-52.
- ZHANG Rui, LIU Yichuan, ZHU Delan, et al. Construction and validation of the improved Ballistic model for sprinkler water trajectory considering jet fragmentation and droplet shape[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(5): 43-52. (in Chinese with English abstract)
- [10] CHEN R, LI H, WANG J, et al. Effects of pressure and nozzle size on the spray characteristics of low-pressure rotating sprinklers[J]. *Water*, 2020, 12: 2904.
- [11] ZAPATA N, SALVADOR R, LATORRE B, et al. Effect of a growing maize canopy on solid-set sprinkler irrigation: kinetic energy dissipation and water partitioning[J]. *Irrigation Science*, 2021, 39(3): 329-346.
- [12] ATLAS D, ULBRICH C W. Path- and area-integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3 cm band[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1977, 16(12): 1322-1331.
- [13] GE M S, WU P T, ZHU D L, et al. Comparison between sprinkler irrigation and natural rainfall based on droplet diameter[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2016, 14(1): e1201.
- [14] CAROLLO F G, SERIO M A, FERRO V, et al. Characterizing rainfall erosivity by kinetic power-median volume diameter relationship[J]. *Catena*, 2018, 165: 12-21.

- [15] 徐红, 龚时宏, 刘兴安, 等. 双喷嘴摇臂式喷头洒水水滴运动模拟与验证[J]. 水利学报, 2012, 43(4): 480-486.
XU Hong, GONG Shihong, LIU Xing'an, et al. Simulation and experimental study on the droplet simulated motion of double-nozzle impact sprinkler[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(4): 480-486. (in Chinese with English abstract)
- [16] ZHANG R, LIU Y C, ZHU D L, et al. Comparative analysis of micro-physical characteristics of sprayed droplets using various measurement technologies[J]. *Irrigation Science*, 2024, 42(4): 701-719.
- [17] XIANG Q J, QURESHI W A, TUNIO M H, et al. Low-pressure drop size distribution characterization of impact sprinkler jet nozzles with and without aeration[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106458.
- [18] BAUTISTA-CAPETILLO C, ZAVALA M, PLAYÁN E. Kinetic energy in sprinkler irrigation: Different sources of drop diameter and velocity[J]. *Irrigation Science*, 2012, 30(1): 29-41.
- [19] ZHANG R, Liu Y C, ZHU D L, et al. Simulating droplet distribution characteristics for sprinkler irrigation with a modified ballistic model[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 215: 108437.
- [20] 张晓敏, 朱德兰, 葛茂生, 等. 轻小型平移式喷灌机低压末端喷头改进设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 75-82.
- ZHANG Xiaomin, ZHU Delan, GE Maosheng, et al. Improved design and testing of the low-pressure end sprinkler nozzles for light and small pan irrigation sprinklers[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(4): 75-82. (in Chinese with English abstract)
- [21] CHANG W Y, LEE G W, JOU J D, et al. Uncertainty in measured raindrop size distributions from four types of collocated instruments[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1167.
- [22] 李久生. 谈平均水滴直径的计算方法[J]. 喷管技术, 1987(4): 21-23.
- [23] CAROLLO F G, FERRO V, SERIO M A. Estimating rainfall erosivity by aggregated drop size distributions[J]. *Hydrological Process*, 2016, 30: 2119-2128.
- [24] SERIO M A, CAROLLO F G, FERRO V. A method for evaluating rainfall kinetic power by a characteristic drop diameter[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 577: 123966.
- [25] 马廷, 周成虎. 基于雨滴谱函数的降雨动能理论计算模型[J]. 自然科学进展, 2006, 16(10): 1251-1256.
MA Ting, ZHOU Chenghu. Theoretical calculation model of rainfall kinetic energy based on raindrop spectrum function. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(10): 1251-1256. (in Chinese with English abstract)

A calculation method of droplet equivalent indicators of sprinkler irrigation based on energy-weighting

ZHANG Rui^{1,2}, LIU Yichuan³, ZHU Delan^{1,2*}, WU Pute^{2,4,5,6}, ZHANG Xiaomin⁷

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. China Water Northeast Survey and Design Co., Ltd, Changchun 130012, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 5. National Engineering Research Centre for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling 712100, China; 6. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 7. Hydrology Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830099, China)

Abstract: Droplet velocity and particle size determine droplet kinetic energy and have a major impact on soil erosion, crop leaf strike and farm microclimate. The equivalent droplet velocity and diameter describe the average characteristics of the droplet and they are important parameters for measuring the spray quality of the nozzle and the degree of droplet fragmentation. Traditional droplet testing methods can only measure number and particle size, so the equivalent method previously used cannot calculate the average droplet characteristics in terms of droplet energy. With the widespread use of optical instruments in sprinkler tests, droplet velocities can also be measured and the corresponding methods for calculating droplet equivalent indicators should be improved and developed. This study proposed an energy weighted method for calculating droplet equivalent indicators. Based on droplet data sprayed by five types of sprinkler nozzles, the characteristics, and differences between the calculation results of the energy weighted method and other types of methods were compared. The regression relationship between energy weighted equivalent indicators and other types of indicators was established. The results showed that: 1) The energy weighted equivalent droplet diameter was the largest, followed by the equivalent method related to droplet volume, and the smallest is the equivalent method related to droplet number. The overall trend in droplet equivalent diameter related to energy and volume along the radial direction was relatively similar, but there were significant differences at the proximal end of the spray. This is because although a larger proportion of smaller droplets occupy the near end of the spray water, there are also a certain number of large droplets which, after being ejected from the nozzle outlet, fall steeply to the ground without being sufficiently broken up. Large droplets carry a greater kinetic energy and contribute more to the energy at the measurement point, so the energy weighted droplet equivalent diameter is more biased in favour of these large droplets. 2) The droplet equivalent velocity and equivalent diameter calculated by the energy weighted equivalent method can characterise droplets with a high energy contribution. The histogram of the distribution of the number of droplet velocities showed that droplets with velocities less than 6 m/s occupied a large proportion of the droplets. The IWOB nozzle, for example, had a number weighted equivalent velocity of 3.93 m/s, corresponding to a droplet number accumulation frequency of 29.7%, but an energy accumulation frequency of only 4.5%. The energy weighted equivalent droplet velocity was 4.55 m/s. The number of droplets less than this velocity carries about 43.8% of the energy and the number of droplets greater than this velocity is about 21.4%. This velocity was between the maximum velocity and the number-weighted equivalent droplet velocity and may represent the velocity characteristics of a large droplet carrying more energy. 3) There was a good exponential regression between the droplet terminal velocity calculated by the empirical formula and the energy weighted equivalent droplet velocity, and there was a good exponential regression between the equivalent droplet diameter related to volume and the energy weighted equivalent droplet diameter, with correlation coefficients greater than 0.80. 4) The energy weighted equivalent droplet kinetic energy provided a better estimate of the kinetic energy of precipitation per unit time and area, with a coefficient of determination of 0.84 for the logarithmic regression relationship. The results of the study may provide ideas for reflecting the average characteristics of droplets from an energy perspective.

Keywords: energy; sprinkler irrigation; droplet; equivalent indicators; kinetic energy; diameter; velocity